ATARI®

Home Computer ATARI

SCRAM

Simulazione del Funzionamento di un Impianto Nucleare

ATARI®

Indice

P R E F A Z I O N E

A L L ' E D I Z I O N E   I T A L I A N A

A oltre quarant'anni da quando Enrico Fermi realizzò e mise in funzione il primo reattore nucleare della storia sono in esercizio nel mondo circa 250 centrali nucleari. Eppure questa macchina, un tempo annunciata come sorgente di illimitati benefici per l'umanità, non riscuote ancora, presso larghi settori dell'opinione pubblica, una fiducia commisurata alla sicurezza e all'affidabilità dimostrata.

Non vogliamo in questa sede analizzare le cause di questa "incomprensione" storica - cause che sono culturali e politiche più che tecniche ed economiche - ma ci limitiamo ad osservare che occorre diradare la nebbia di mitizzazioni, sia positive che negative, che ancora si addensa intorno al reattore nucleare, ostacolandone l'accettazione da parte del pubblico.

Il video-gioco "SCRAM", ideato da un gruppo di tecnici che, evidentemente, di queste macchine se ne intendono, è un ottimo strumento per contribuire alla "smitizzazione"del reattore nucleare anche attraverso una sua migliore conoscenza, almeno nei riguardi delle giovani generazioni,fruitrici per eccellenza di questi giochi, tipici della civiltà dell'informatica.

Per questo abbiamo assunto il compito di tradurlo dall'inglese in italiano e renderlo accessibile ai giovani del nostro paese, pur riconoscendo che, in molti aspetti, esso non rispecchia la situazione reale nella quale operano i reattori nucleari.

Ma spieghiamoci meglio. La macchina che noi vediamo riprodotta, schematicamente, sullo schermo del nostro video-gioco, riproduce perfettamente un reattore nucleare ad acqua naturale, del tipo di quelli in uso anche in Italia, sia pure con qualche semplificazione, che non tocca peraltro la sostanza dei principi fisici ed ingegneristici che sono alla base del suo funzionamento.

I dati di temperatura e di pressione dell'acqua nei vari punti del circuito e le reciproche influenze che determinano il buono o il cattivo funzionamento del reattore, riproducono anch'essi la realtà. Quello

che varia, invece, rispetto a quest'ultima, sono innanzitutto le conseguenze del terremoto sull'integrità e sull'efficienza delle diverse componenti del reattore. Il gioco consiste infatti nel manovrare un reattore nucleare, oggetto di ondate incalzanti di scosse sismiche, e nel far fronte ai guasti mediante l'intervento di squadre di tecnici.

Nella realtà le singole apparecchiature, pompe, tubi, valvole, scambiatori di calore, sono progettati, costruiti e collaudati in maniera che nessun terremoto o altro evento esterno ipotizzabile, per quanto catastrofico, possa danneggiarle in modo tale da compromettere l'integrità del sistema e portare alla temuta **fusione del nocciolo.**
Si potrebbe aggiungere che anche quest'ultima ipotesi, pur enormemente remota, è stata contemplata dai progettisti e dalle norme di sicurezza che presiedono alle procedure di autorizzazione delle centrali nucleari.

Nulla, nelle centrali reali, è lasciato all'incertezza ed anche la localizzazione dei guasti eventuali, che nel gioco dello "SCRAM" è lasciata all'intuizione ed alle capacità logiche del giocatore, nel reattore vero è individuata, segnalata e neutralizzata da un complesso ridondante di sistemi di sicurezza.

C'è poi un'altra differenza fondamentale: nel gioco, l'abilità del giocatore si misura, alla fine, sulla quantità di energia elettrica che è riuscito a produrre prima di mandare il reattore in **SCRAM**, cioè prima di bloccarlo. Nella realtà, queste sfide alla sorte sono impossibili: prima di tutto, perché l'arresto del reattore avviene automaticamente al verificarsi del guasto e, in secondo luogo, perché il principio della massima sicurezza, non solo sancito dalla normativa giuridica, ma tradotto in criteri ingegneristici ed in rigidi controlli gestionali, non consente la produzione di un solo chilowattora nel caso in cui le condizioni di sicurezza vengano meno in seguito ad un fatto accidentale.

Fatte queste premesse, si può ancora affermare che il gioco dello "SCRAM" oltre ad una felice invenzione sul piano ricreativo, resta pienamente valido come approccio smitizzante ad una realtà industriale quale il reattore nucleare, con la quale bisogna imparare a convivere se si vuol cogliere un'importante occasione che la tecnologia ci offre per contribuire a risolvere il fondamentale problema dell'energia.

ENEA

COMITATO NAZIONALE
PER LA RICERCA E PER LO SVILUPPO
DELL'ENERGIA NUCLEARE
E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE

Prefazione

Cosa Significa SCRAM

● Università di Chicago 2.12.1942 ore 15.36

Sotto le tribune dello "Stagg field" un gruppo di scienziati è riunito per fare un esperimento di portata storica. Debbono far entrare in funzione il primo reattore nucleare del mondo. Come si comporterà? Nessuno di loro lo sa con certezza. Hanno due problemi fondamentali. Come mettere in funzione il reattore e, forse ancora più importante, come arrestarlo una volta messo in funzione. Quali forze si scateneran- no se non arriveranno a fermarlo in tempo ?

Vengono approntati tre sistemi di sicurezza:

- un sistema automatico elettrico,
- un sistema chimico azionato da tre scienziati che si trovano in cima al reattore,
- una barra di controllo chiamata ZIP.

Zip viene calata nel reattore da grossi pesi. Per innescare la reazio- ne, essi devono tirare Zip fuori dal reattore e tenerla a posto legan- dola con delle corde. Uno scienziato munito di ascia sta attento alla corda. In caso di necessità la taglierà, lasciando cadere Zip nel reat- tore, fermando così la reazione. Egli osserva attentamente il capo del gruppo, Enrico Fermi. Una parola da lui, e darà un colpo secco alla corda. Questa parola è **SCRAM** ("dacci un taglio subito"). Ma Fermi non dice **SCRAM**, il reattore funziona come previsto.

● Three Mile Island 28.3.1979 ore 4.00

Nell'interno del reattore N° 2 della centrale nucleare di Three Mile Island si blocca una valvola nel sistema di purificazione dell'acqua del circuito secondario. Entro pochi secondi si arresta la pompa di alimentazione principale. Si bloccano le turbine e i generatori di vapore restano a secco. Alle 4.01 si sente una voce all'altoparlante "Abbiamo un arresto di turbine ed uno Scram del reattore". Questa vol- ta le cose non si svolgono come previsto.

1 Informazioni Generali

FASCIA DI ETA': Dai 12 anni in poi.

Caratteristiche

SCRAM è più di un gioco. E' una simulazione didattica che insegna i principî del funzionamento di una centrale nucleare in maniera realistica e divertente. Si comincia con il costruire una centrale nucleare tipo, sul modello del reattore N° 2 della centrale nucleare di Three Mile Island. Quando la centrale è pronta, iniziamo il giocatore al nostro programma di insegnamento; esso mostra al giocatore come una centrale nucleare trasforma l'energia nucleare in elettricità; quindi gli insegna ad azionare la centrale da solo, dandogli perfino la possilità di fondere il nocciolo del reattore.

L'ultima fase del programma di insegnamento è l'esame di qualificazione, che si presenta sotto forma di gioco, il gioco dello **SCRAM.**
SCRAM mette alla prova l'abilità del giocatore nel far funzionare la centrale nucleare in condizioni di emergenza. E mentre il terremoto distrugge una componente vitale dopo l'altra, il giocatore deve cercare di mantenere in funzione la centrale nucleare. Deve far generare più elettricità possibile mentre individua e ripara le componenti danneggiate. E' una corsa contro il tempo.
Riuscirà a disattivare il reattore prima che il nocciolo fonda ?

Per i giocatori che hanno bisogno di aiuto nel gioco dello **SCRAM**, abbiamo un corso denominato "Come riuscire nel gioco dello **SCRAM**" (Cap. 9). Inoltre, l'appendice contiene utili informazioni sui limiti dello **SCRAM** (accuratezza della simulazione) ed un resoconto sull'incidente di Three Mile Island. L'incidente di T.M.I. viene discusso in termini adatti alla simulazione ed è particolarmente utile dopo che il giocatore ha imparato a far funzionare la simulazione della centrale nucleare.

Attitudini Sviluppate

Lo **SCRAM** sviluppa le attitudini a:

- pensare in maniera logica ed obiettiva,
- riconoscere modelli di sistemi complessi,
- individuare il rapporto causa-effetto,
- analizzare i problemi e risolverli.

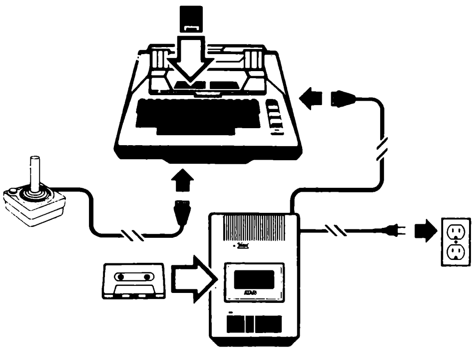
Scopo

- Istruzione
- Ricreazione
- Sviluppo di qualità personali.

2 Preparazione

Componenti Atari Richiesti

1) Home Computer Atari Modello 800 oppure Modello 400 avente:
   - un minimo di 16K di memoria RAM,
   - cassetta BASIC Atari per il linguaggio computerizzato,
   - un Comando a Cloche (Joystick).
2) Un Registratore di programmi atari Modello 410.
3) Cassette per il programma **SCRAM**.



Caricamento della Cassetta

1) Collegate il vostro Modello 800 oppure 400 al vostro televisore, seguendo il manuale di istruzioni.
2) Collegate il filo del Registratore 410 allo spinotto delle perife-riche sul lato destro del vostro Home Computer Atari.

   NOTA:

   Se altre periferiche Atari, come ad esempio l'unità a dischi o la tastiera, sono collegate in serie al computer, collegate il registratore 410 al raccordo I/O dell'ultima periferica della catena.

3) Collegate la spina del registratore Atari 410 ad una presa nella parete da 220V.

4) Inserite nel vostro Home Computer la quantità di RAM necessaria per far funzionare il programma **SCRAM**. La cassetta contiene 2 versioni del programma **SCRAM**: 16K e 24K.

   La versione 16K è stata progettata specificatamente per l'Home Computer Atari Modello 400 che non può accogliere programmi che abbiano più di 16KBytes. Funziona anche con un Atari 800 nel quale siano stati inseriti 16K RAM. Occorre un po' più di tempo per inserire questa versione che non la versione a 24K, ma non vi è differenza nel contenuto del programma.

   La versione 24K può essere usata solo con il computer Atari 800 nel quale sia stato inserito un minimo di 24K RAM.

   Oltre ai 16 e 24K Bytes RAM necessari allo **SCRAM**, occorre altro RAM se il vostro Personal Computer è collegato ad una Unità a Dischi della Atari. Per ulteriori dettagli vedasi Nota N° 1 alla fine delle istruzioni per l'inserimento.

5) Inserire la cassetta **BASIC** della Atari.
   Sull'Atari 800 usare la fessura di sinistra.

6) Collegare il Governo a Cloche allo spinotto N° 1 sulla parte anteriore del computer.

7) Accendere il televisore.

8) Accendere il computer. L'interruttore si trova sul lato destro del computer.

9) Se tutta l'apparecchiatura è ben collegata e alimentata, sul video del televisore apparirà il segnale **READY**. Sotto di esso apparirà un cursore bianco. Se avete delle difficoltà di inserimento leggete le note alla fine di queste istruzioni.

10) Premere il tasto **STOP-EJECT** sul registratore per l'apertura dello sportello della cassetta.

11) Inserire la cassetta tenendo il lato con il nastro verso di voi. Se adoperate un Atari 400 o un Atari 800 a 16K RAM, la targhetta 16K deve essere visibile. La versione 24K dello **SCRAM** può essere usata solo con l'Atari 400 disponente di un minimo di 24K RAM.

12) Inserire la cassetta e chiudere lo sportello.

13) Se occorre, premere il pulsante **REWIND** per riavvolgere il nastro. Quando è riavvolto premere **STOP-EJECT**.

14) Battere sulla tastiera la parola CLOAD e premere il tasto **RETURN**. Il computer emette un segnale per ricordarvi di premere il tasto **PLAY**.

15) Premere **PLAY** sul registratore e **RETURN** sul computer per azionare la cassetta; attraverso l'apposito finestrino assicuratevi che il nasto giri.

16) Dopo circa 20 secondi avvertirete una serie di segnali acustici

dal vostro televisore. Questi suoni significano che il programma preliminare di informazione si sta inserendo nella memoria RAM. L'inserimento è avvenuto quando sul video appare la scritta **READY.**

17) Quando appare la scritta **READY** digitare la parola **RUN** e premere il tasto **RETURN**. La sigla Atari e le parole **LOADING SCRAM** appariranno sul video. Il computer emetterà un suono per segnalare l'inizio dell'inserimento del programma. Controllare che il nastro sia avviato. Dopo circa 20 secondi udirete ancora una serie di suoni che indicano che il programma **SCRAM** si sta inserendo nel computer.

    Occorrono circa 5 minuti per l'inserimento sulla versione 24K. L'inserimento è avvenuto quando sul video appare la scritta **COSTRUZIONE CENTRALE NUCLEARE.**

    Occorre un tempo leggermente superiore per inserire la versione 16K, e ciò avviene in due tempi. Il 1° stadio è completato quando sullo schermo appaiono le parole COSTRUZIONE CENTRALE NUCLEARE. A quel punto il nastro subisce un breve arresto.Appaiono le parole ATTENDIAMO LICENZA DA NRC (Autorità USA per la Sicurezza Nucleare) il computer emette un suono per segnalare il 2° tempo dell'inserimento ed il nastro continua a girare. Sulla versione 16K l'inserimento è terminato quando appare la didascalia alla base dello schermo (vedasi Fig. 2) e la centrale nucleare è in funzione sullo schermo. A questo punto si sente il rombo delle turbine. Se non sentite le turbine, aumentate il volume del televisore.

18) Quando il programma **SCRAM** è completamente inserito, riavvolgete il nastro azionando il tasto **REWIND**.

    Riavvolgete sempre il nastro per proteggerlo dall'ossidazione prematura.

NOTA

1. Se l'Unità a Disco Atari è collegata al computer, il "Disk Operating System" (DOS) e il programma adoperano una parte del RAM disponibile in aggiunta al RAM richiesto per azionare il programma stesso.
2. Se avete problemi nell'inserimento dello **SCRAM** e avete delle periferiche in aggiunta al registratore collegato al computer, provate a staccare le periferiche e a collegare il registratore direttamente al computer per isolare il problema. Se il problema persiste, consultare il manuale di funzionamento del Registratore Modello 410.
3. Se l'immagine del reattore rimane invariata sullo schermo per più di 9 minuti, cambierà di colore per proteggere il vostro video. Non vi sono guasti al vostro televisore o programma. Basta premere un tasto qualsiasi sulla tastiera del computer ed il video tornerà normale.

3 Costruzione del Reattore N. 2 della Centrale Nucleare "Valle Fiorita"

Dopo aver inserito lo **SCRAM** battere la parola **RUN** e premere il tasto **RETURN** per iniziare la costruzione del reattore N° 2 della centrale nucleare di **Valle Fiorita**. Occorrerebbero normalmente 5 anni per costruire una centrale nucleare, noi ne costruiamo una sotto i vostri occhi.

Ora che la nostra centrale nucleare è completata, dobbiamo richiedere una licenza per l'esercizio alla "NRC - Autorità USA per la Sicurezza Nucleare". L'NRC darà la licenza dopo aver studiato e verificato il nostro rapporto sull'impatto ambientale e il Rapporto finale di analisi della sicurezza. Occorrerebbero normalmente altri 5 anni per ottenere questa licenza, ma nel nostro gioco la possiamo avere in 5 secondi. Appena sentirete il rombo delle turbine, la centrale di **Valle Fiorita** è in funzione.

4 Come Usare la Simulazione

La centrale nucleare che vedete sul vostro video, il reattore N° 2 della centrale nucleare di **Valle Fiorita** è una simulazione o modello semplificato di un autentico impianto nucleare. E' simile al reattore N° 2 della centrale nucleare di Three Mile Island. la Centrale di **Valle Fiorita** genera elettricità trasferendo l'energia sotto forma di calore dal reattore nucleare alle turbine che azionano i generatori.

Nel capitolo seguente, Cap. 5, vi insegneremo a far funzionare la centrale nucleare di **Valle Fiorita**. Abbiamo preparato un programma di addestramento speciale per farvi diventare operatore. Si comincia con una visita alla centrale: potrete vedere come è stato progettato l'impianto per trasferire il calore dal reattore ai generatori, e imparerete come agiscono le principali componenti. In seguito farete degli esperimenti controllati per vedere ciò che avviene nel sistema. Vi sarà insegnato a calare le barre di controllo nel nocciolo del reattore ... una possibilità esclusiva del nostro programma di addestramento.

Nel Capitolo 6 imparerete come il flusso di calore viene modificato dalle variazioni di temperatura e di pressione. Questo corso si chiama termodinamica 1/A, e vi mette in condizione di leggere gli indicatori della centrale.
Gli indicatori, dei quali si parla nel Capitolo 7, vi tengono informati sulla temperatura, la pressione e la produzione di energia. Se imparerete a leggere rapidamente gli indicatori, vi troverete ben preparati per il vostro esame di qualificazione **"Il gioco dello SCRAM"**.

Il gioco dello **SCRAM** mette alla prova la vostra abilità di produrre energia in condizioni di emergenza senza fondere il nocciolo del reattore; se in questo esame otterrete un punteggio alto, verrete qualificati "Operatori di reattore nucleare". Se supererete l'esame con onore diventerete operatore "Senior".
Nel Capitolo 8 vi diremo come giocare allo **SCRAM**. Prima però dovrete completare il programma di addestramento per capire come funziona una centrale nucleare.

Unita' di Misura Utilizzate

Il programma è fornito in una versione tradotta in lingua italiana per quanto riguarda le scritte, ed in unità metriche non anglosassoni per quanto riguarda le unità di misura.
Il manuale mantiene le unità anglosassoni, quindi di seguito viene fornita una tabella di conversione per pressioni e temperature.

1 - **SISTEMI DI MISURA**

- **Sistema Anglosassone** (Avoirdupois)

PRESSIONE	PSI	[lb/sq.in]
TEMPERATURA	F	(Fahrenheit)

- **Sistema Internazionale** (S.I.):

PRESSIONE	Pa	$[N/m^2]$	(Pascal)
TEMPERATURA	°K		(Kelvin)

- Nella pratica, nei paesi non anglosassoni, vengono adottate le seguenti unità di misura:

PRESSIONE	BAR	$[10E5\ N/m^2]$	
TEMPERATURA	°C		(Celsius o centigrado)

2 - **CONVERSIONE DA PSI A BAR**

1 PSI=1 libbra/pollice^2 = (0.4536kp)/(2.54^2 cm^2) = 0.07037 ATE (atmosfera)

1 ATE=1 Kp/cm^2 = 10E3 kp/m^2 = 9.80665*10E4 N/m^2 = 0.980665 BAR

QUINDI:

1 PSI = 0.07037 * 0.980665 = 0.069 BAR

3 - **CONVERSIONE FAHRENHEIT - CENTIGRADI**

Ø gradi C = 32 gradi F

1 grado C = 9/5 gradi F

QUINDI:

n Gradi F = (n-32)*5/9 Gradi C

E

h Gradi C = (h*9/5+32) Gradi F

5 Programma di Addestramento

Visita alla Centrale Nucleare

La nostra centrale nucleare di **Valle Fiorita** ospita un sistema di reat-
tore ad acqua pressurizzata (PWR). I sui tre circuiti ad acqua trasfe-
riscono il calore dal reattore alle turbine e da lì alla torre di raf-
freddamento. La torre di raffreddamento rilascia calore nell'aria e
restitituisce l'acqua al circuito di raffreddamento.

Innanzitutto faremo un rapido giro della centrale per vedere come funziona il sistema di trasferimento del calore. Ripeteremo il giro per osservare più da vicino le componenti principali.

ASPETTI GENERALI

Il calore usato dall'impianto per generare elettricità viene prodotto da reazioni di fissione nucleare a catena nel nocciolo del reattore. Fissione significa semplicemente scissione. La fissione nucleare è il processo di scissione dei nuclei degli atomi di materiale fissi-
le, come l'uranio 235. I nuclei vengono scissi tramite bombardamento con particelle subatomiche chiamate neutroni. Quando i nuclei si scin-
dono, liberano altri neutroni, alcuni dei quali incontrano e scindono altri nuclei. Così ha inizio una reazione di fissione a catena. Una reazione di fissione libera l'energia contenuta nei nuclei e genera una grande quantità di calore (Fig. 1).

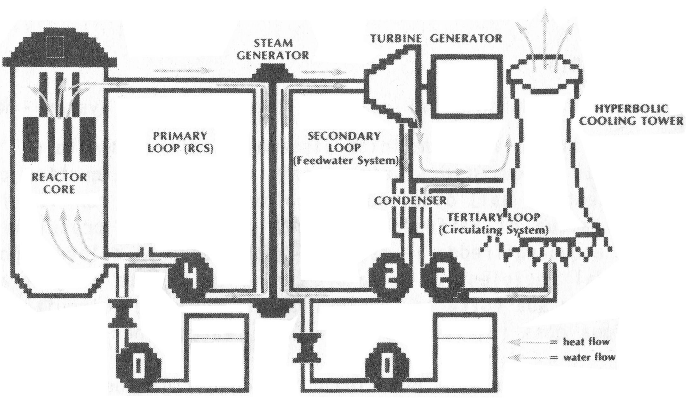


Fig. 1 - Trasferimento del calore nel sistema PWR.

Guardate ora la figura 1. Il calore generato dalla fissione nucleare viene estratto dal nocciolo ad opera dell'acqua che circola nel circuito di raffreddamento primario. Di qui, attraverso uno scambiatore (o generatore di vapore) il calore passa al circuito secondario dove si trova la turbina. Nel circuito secondario l'acqua si trasforma in vapore ed è questo, appunto, che fa girare la turbina. La turbina, a sua volta, fa girare il generatore, che produce l'elettricità. Il gruppo turbina-generatore si chiama turbogeneratore.
Dopo aver attraversato la turbina, il vapore entra nel condensatore, dove è raffreddato da un terzo circuito, detto appunto terziario o di raffreddamento, e qui viene ritrasformato in acqua. L'acqua del circuito terziario passa attraverso la torre di raffreddamento, dove cede gran parte del suo calore all'atmosfera. (Le centrali nucleari, specie se si trovano in prossimità del mare, dove esistono grandi possibilità di diluizione del calore, possono fare a meno delle grandi torri di raffreddamento).

Ora ritorneremo al punto di partenza del nostro giro per dare un'occhiata più dettagliata all'impianto. Consultate le figure 1 e 2.

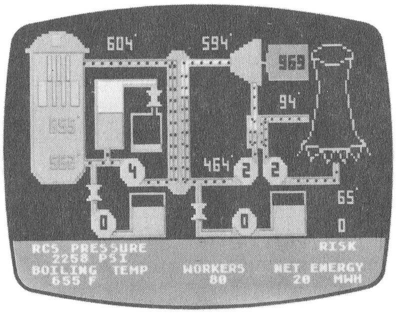


Fig. 2 - Centrale Nucleare di Valle Fiorita - Reattore N° 2.

CIRCUITO PRIMARIO

Sistema di raffreddamento del reattore (Reactor Cooler System - RCS).

Il circuito primario viene definito sistema di raffreddamento del reattore (RCS). Il circuito o sistema inizia dove sono le quattro pompe RCS (rappresentate dall'ottagono di colore arancione con il N° 4), che pompano acqua di raffreddamento nel recipiente a pressione del reattore. L'acqua raffredda il reattore, assorbendo il calore e portandolo fuori dal recipiente. Il calore viene trasferito al generatore di vapore, che a sua volta lo trasferisce all'acqua del circuito secondario. L'acqua così raffreddata ritorna al reattore per effetto delle pompe.
Diamo un'occhiata ora alle principali componenti di questo circuito.

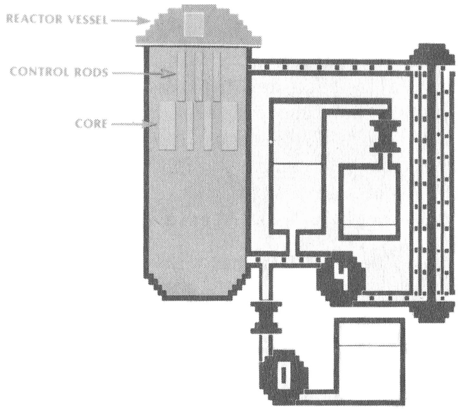


Fig. 3 - Il Reattore.

REATTORE

Il reattore (Fig. 3) è composto da nocciolo, barre di controllo e recipiente a pressione (vessel). Il nocciolo è un fascio di barre di combustibile, ciascuna delle quali è riempita di pasticche di uranio. Fra le barre vi sono degli spazi per la circolazione dell'acqua di raffreddamento e per l'inserimento delle barre di controllo. Il nocciolo può generare una quantità enorme di energia. Un reattore tipo ha una potenza di tre miliardi di watts, che equivalgono all'incirca a quattro milioni di HP. Ancora più sorprendente è la concentrazione di potenza nel nocciolo del reattore, che è poco più grande di un minibus. Il nocciolo può continuare a provocare reazioni nucleari e a generare energia per un anno intero senza aggiunta di combustibile. Le barre di controllo sono fatte di un materiale che assorbe i neutroni responsabili della reazione a catena. Quando le barre di controllo vengono calate fino in fondo nel nocciolo, tutti i neutroni vengono assorbiti. Le reazioni a catena si arrestano e il nocciolo non può generare energia. Nel nostro gergo diciamo che il reattore è "scrammed" (disattivato).

Se le barre di controllo vengono calate solo parzialmente nel nocciolo, rimangono alcuni neutroni a provocare reazioni a catena, e il nocciolo genera una certa quantità di energia. Il reattore in questo caso non è disattivato, perchè alcune reazioni continuano. Per produrre l'arresto rapido del reattore dobbiamo calare le barre fino in fondo al reattore e arrestare tutte le reazioni. Se solleviamo le barre completamente fuori dal nocciolo del reattore, i neutroni scorrono liberamente attraverso il nocciolo, provocando reazioni a catena, e il nocciolo genera il massimo di energia.

IL RECIPIENTE A PRESSIONE

Consiste in un contenitore in acciaio pesante, pieno d'acqua. L'acqua entra attraverso un tubo alla base del "vessel", assorbe calore dal nocciolo ed esce attraverso un tubo situato nella parte superiore. Come si può vedere dalla figura 4, la temperatura dell'acqua è di 562° F all'ingresso dell'involucro del reattore, 655°F alla superficie del nocciolo e di 604°F all'uscita dall'involucro. La temperatura dell'acqua sulla superficie del nocciolo è la stessa della temperatura del nocciolo stesso.

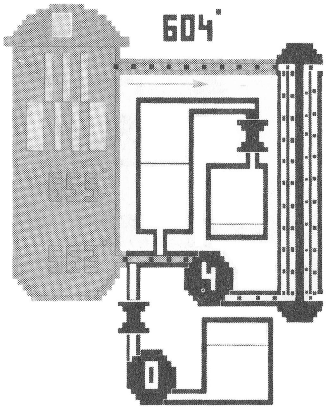


Fig. 4 - Il contenitore del Reattore.

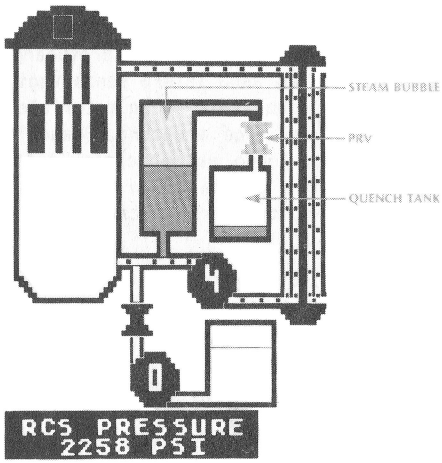


Fig. 5 - Il pressurizzatore.

PRESSURIZZATORE

Il pressurizzatore (Fig. 5) regola la pressione del circuito primario ammortizzando gli sbalzi di pressione improvvisi (transitori) e mantenendo la pressione entro limiti normali (da 2.200 a 2.300 psi). Quando la pressione è normale, il pressurizzatore contiene metà acqua e metà vapore; la "bolla" di vapore fa da "cuscino" ai cambiamenti di pressione. Nella simulazione il colore giallo rappresenta il vapore. Imparerete altre cose sul pressurizzatore quando studierete la termodinamica 1A nel capitolo 6.

GENERATORE DI VAPORE

Il calore dal "vessel" del reattore viene portato, ad opera dell'acqua, al generatore di vapore (Fig. 6). Si tratta di un dispositivo assai semplice, formato da tanti tubi piccoli all'interno di un grande cilindro. L'acqua calda del circuito primario scorre in basso nei tubi piccoli; l'acqua di raffreddamento del circuito secondario scorre verso l'alto nel cilindro. I due circuiti sono completamente isolati tra loro: le acque non si mescolano mai. Ma il calore passa attraverso le sottili pareti dei tubi più piccoli, penetra nell'acqua di raffreddamento del cilindro e fa bollire l'acqua trasformandola in vapore.

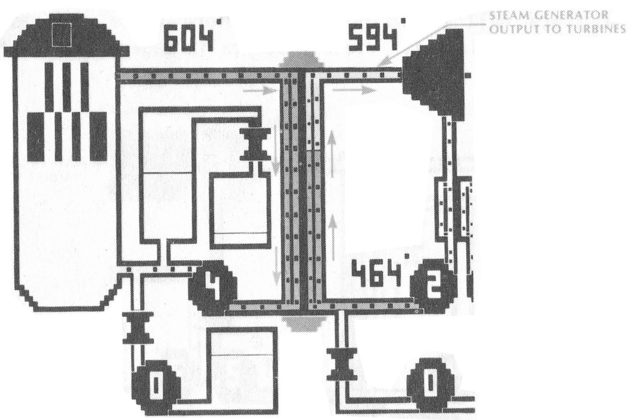


Fig. 6 - Il Generatore di vapore.

CIRCUITO SECONDARIO

Sistema acqua-vapore.

Il circuito secondario viene anche chiamato sistema acqua-vapore. Inizia con le due pompe principali di alimentazione (rappresentate da un ottagono di colore arancione con il N° 2) che pompano acqua nel generatore di vapore. All'ingresso del generatore la temperatura dell'acqua è di 464°F.

Il vapore caldo scorre quindi dal generatore verso le turbine che azionano i generatori di elettricità. Nella simulazione, la linea gialla mobile indica il flusso di vapore. La temperatura del vapore è di 594°F.
Il vapore dalle turbine viene portato al condensatore attraverso i tubi e condensato in acqua. L'acqua raffreddata viene rimandata per mezzo di tubi alle pompe principali di alimentazione.

Ora diamo un'occhiata alla turbina, al generatore di elettrricità e al condensatore.

TURBINE E GENERATORE

Una turbina è un ventilatore gigante con numerose palette. Se riuscite ad immaginare una spazzola che gira dentro ad una bottiglia, avete una giusta visione di una turbina. La turbina è azionata da una combinazione della "spinta" del vapore che entra e dalla trazione del vapore che viene succhiato verso il condensatore. La turbina aziona il generatore di elettricità, rappresentato nella figura 7 da un rettangolo verde. Il rettangolo mostra la produzione istantanea di energia del generatore, misurata in megawatts (MW).
La produzione netta di energia, ovvero la quantità totale di energia generata dal momento in cui aveta messo in moto la centrale nucleare, viene mostrata nell'angolo destro inferiore della didascalia sotto il disegno. L'energia netta viene misurata in megawattore (MWH).

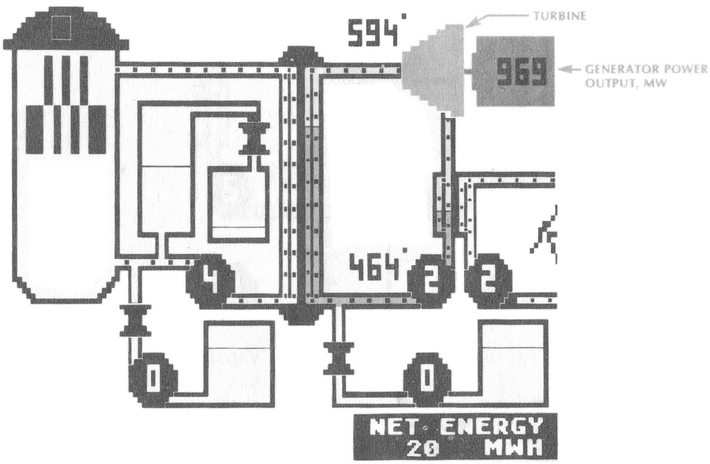


Fig. 7 - Turbina e Generatore.

IL CONDENSATORE

E' uno scambiatore di calore come il generatore di vapore. Consiste in alcuni tubi piccoli all'interno di un tubo grande. Il vapore caldo

scorre dalla turbina verso il basso nei tubi piccoli e trasferisce calore all'acqua di raffreddamento, nel circuito terziario, che circo-la verso l'alto attraverso il tubo grande. Dopo aver ceduto il calore, il vapore si condensa in acqua e viene trasportato attraverso i tubi alle pompe di alimentazione principali.

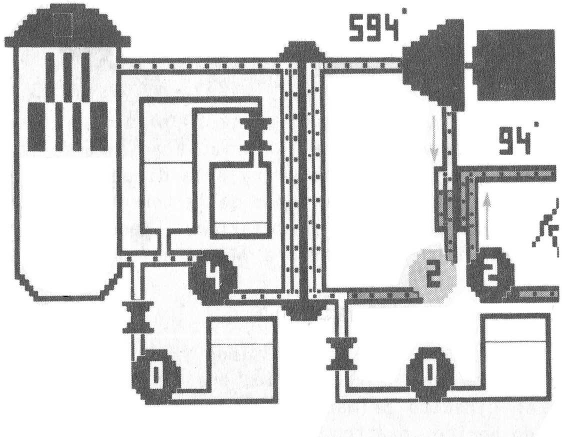


Fig. 8 - Il Condensatore.

CIRCUITO TERZIARIO

Sistema di raffreddamento del condensatore.

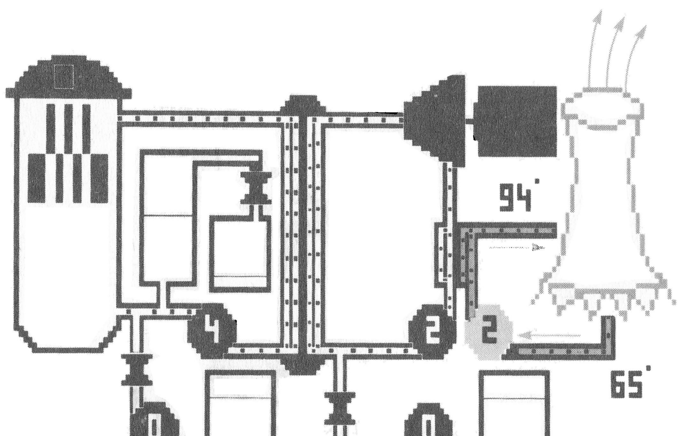


Fig. 9 - La Torre di Raffreddamento

Il terzo circuito inizia alle due pompe di circolazione d'acqua rappresentate dall'ottagono di colore arancione con il N° 2. L'acqua pompata nel condensatore assorbe calore dal vapore, e lo trasporta nella torre di raffreddamento, che a sua volta lo libera nell'aria. L'acqua raffreddata viene poi condotta indietro tramite tubi fino alle pompe di circolazione.

TORRE DI RAFFREDDAMENTO

Nella torre di raffreddamento (Fig. 9) l'acqua calda che viene dal condensatore cade da un'altezza di circa 20 piedi; una parte evapora nella caduta, trasferendo calore all'aria. L'aria calda sale alla sommità della torre, permettendo ad altra aria di penetrare nel fondo. L'acqua fredda che raggiunge il fondo della torre viene portata indietro tramite tubi alle pompe di circolazione. L'acqua dal condensatore entra nella torre di raffreddamento a 94°F e ne esce a 65°F.

SISTEMA DI INIEZIONE AD ALTA PRESSIONE

Il sistema di iniezione ad alta pressione (HPI) è un sistema di emergenza che inietta acqua, se necessario, pre far fronte ad ogni deficienza d'acqua nel circuito primario. Esso consiste in un serbatoio di acqua con acido borico, quattro pompe e una valvola. Di solito le pompe sono ferme, dato che questo sistema non è necessario quando l'RCS funziona normalmente. Quando una o più pompe sono in funzione e la valvola è aperta, l'acqua scorre dal serbatoio nell'RCS.

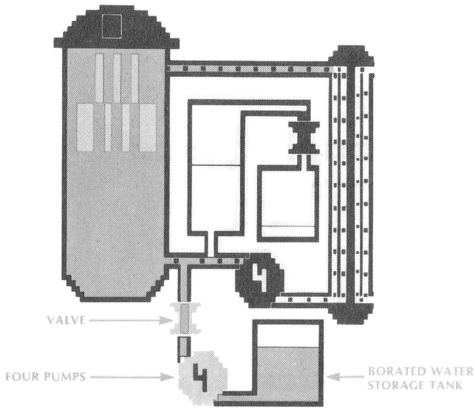


Fig. 10 - Sistema di iniezione ad alta pressione.

SISTEMA AUSILIARIO DEL CIRCUITO SECONDARIO

Il sistema ausiliario del secondario (Fig. 11) viene in soccorso al sistema acqua - vapore nella stessa maniera che l'HPI nei riguardi del primario. Il sistema ausiliario è formato da un serbatoio, tre pompe

ed una valvola. Normalmente le pompe non sono in funzione; quando la valvola viene aperta e una o più pompe vengono messe in moto, l'acqua scorre dal serbatoio nel generatore di vapore.

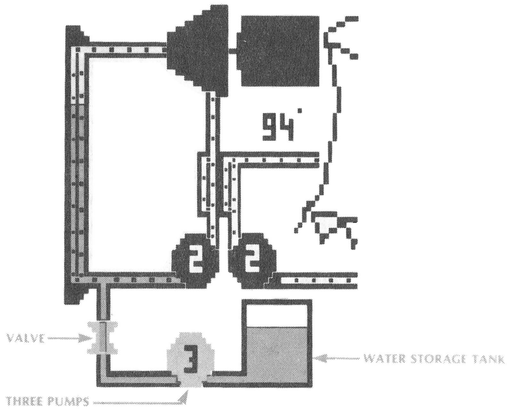


Fig. 11 - Sistema di Circolazione acqua ausiliario.

FINE DELLA VISITA

La nostra visita alla centrale nucleare di **Valle Fiorita** termina qui. Potete ora iniziare a far funzionare la centrale da soli. Se non lo avete già fatto, inserite un Comando a Cloche (joystick) nello spinotto "Controller jack" (all'estrema sinistra del vostro computer). Orientate la Cloche in maniera che il tasto rosso si trovi in alto a sinistra. La figura 12 vi mostra come muovere il Comando a Cloche.

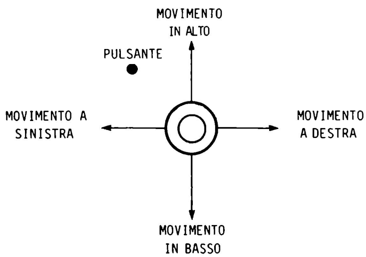


Fig. 12 - Movimenti del Comando a Cloche.

Funzionamento dell'Impianto

Dopo aver inserito il Comando a Cloche nella console del vostro computer trovate il cursore nella simulazione. Si tratta di un quadrato colorato a luce intermittente nella cupola dell'involucro del reattore. Con il Comando a Cloche potete muovere il cursore intorno alla centrale verso le barre di controllo, le pompe e le valvole. Queste sono le uniche componenti controllabili con il Comando a Cloche.

ABBASSAMENTO DELLE BARRE DI CONTROLLO

Il cursore dovrebbe già essere in posizione nella cupola dell'involucro sopra le barre di controllo. Per calare le barre premete e tenete premuto il tasto rosso sul vostro Governo a Cloche e tirate la cloche direttamente indietro verso di voi. Finchè tenete il Governo a Cloche in questa posizione, le barre caleranno nel nocciolo finchè non potranno andare oltre. Più calate le barre del nocciolo e meno luce questo emetterà. Ciò indica che le barre stanno assorbendo neutroni e l'energia prodotta diminuisce. Quando cala la produzione, il nocciolo immette meno calore nell'acqua del RCS e la temperatura comincia a calare in tutta la centrale. Le turbine girano più lentamente (potete ascoltarne il calo) e i generatori producono meno energia. Per aiutarvi a vedere il calare dei livelli di energia di tutta la centrale, le cifre in diminuzione sono sottolineate. Una volta stabilizzata la produzione di energia a livelli più bassi, le sottolineature spariscono.

Ora, con il dito sul tasto rosso spingete il Governo a Cloche dritto in alto verso lo schermo televisivo, e alzate le barre di controllo completamente fuori dal nocciolo. Le temperature inizieranno ad aumentare in tutta la centrale. Le turbine gireranno più velocemente e la produzione di elettricità aumenterà. I valori verranno messi in evidenza fino a che la produzione di energia si stabilizzerà a livelli più alti.

APERTURA DELLE VALVOLE E MESSA IN MOTO DELLE POMPE

Tutte le pompe e le valvole sono colorate in arancione e facili da individuare nella simulazione. Usate solamente il Comando a Cloche e non il tasto per muovere il cursore verso pompe e valvole. Per aprire le valvole e azionare le pompe tenete premuto il tasto rosso e spingete la cloche verso l'alto. Per chiudere le valvole e spegnere le pompe tenete il tasto premuto tirando la cloche verso di voi.

FUSIONE DEL NOCCIOLO DEL REATTORE

Approfittate di questa occasione per fondere il nocciolo. E' piuttosto facile. Dovete solo far scorrere il cursore verso le pompe dell'RCS e spegnere tutte e quattro le pompe. Assicuratevi che le barre di controllo siano state completamente estratte dal nocciolo.
Con tutte le pompe dell'RCS spente non circola più acqua di raffreddamento attraverso il vessel del reattore e la temperatura del nocciolo cresce rapidamente. L'acqua alla superficie del nocciolo diventa così calda da raggiungere il bollore, trasformandosi in vapore, isolando il nocciolo e rendendolo ancora più caldo. Vi accorgerete che ciò è accaduto vedendo lampeggiare la scritta **"BOLLE DI VAPORE"** e udrete suonare l'allarme della centrale.
Quando la temperatura del nocciolo supera i 5.000°F il nocciolo comincia a fondere. Dato che vengono fuse 130 tonnellate di combustibile altamente radioattivo, sul fondo del vessel ne avrete una coloratissima visione.

LA VOSTRA NUOVA CENTRALE NUCLEARE

Ora che vi siete levata questa voglia, cominciate a rimediare al disa-
stro che avete fatto. Premete il tasto **START** sul vostro computer
per ricostruire la centrale. Quando udrete il rombo delle turbine,
sarete di nuovo al lavoro.
Giocate pure con la vostra nuova centrale, che vi diventerà così fami-
liare. Fate scorrere il cursore intorno alla simulazione. Aprite e chiu-
dete le valvole, azionate e spegnete le pompe e prendete nota di ciò
che accade. Questa volta, però, fate più attenzione nel lasciare le
pompe ferme per troppo tempo! Se le temperature dell'RCS crescono trop-
po, calate parzialmente le barre di controllo nel nocciolo.
L'unica cosa che non dovete toccare per ora è la cifra sopra la parola
RISCHIO che appare in basso a sinistra. Questo fa parte del gioco del-
lo **SCRAM** e vi verrà spiegato nel capitolo 8.

6 Termodinamica 1/A

In questo capitolo imparerete:

- I principi basilari del trasferimento di calore nella centrale nucleare.
- Cosa accade quando si squilibrano le temperature.
- Alcuni principi basilari riguardo alla pressione nella centrale nucleare.
- Cosa accade quando le pressioni sono troppo alte o troppo basse.
- In che modo il pressurizzatore mantiene l'equilibrio di pressione.

Quando avrete terminato la termodinamica 1/A passate al capitolo 7 e seguite le istruzioni sugli indicatori della centrale nucleare.

Questi due capitoli vi preparano all'esame di qualificazione: il gioco dello **SCRAM**.

Principi Basilari del Trasferimento del Calore

Per capire come funziona una centrale nucleare dovete tenere ben a mente alcuni principi sul calore:

- calore è energia,
- il calore scorre attraverso la materia,
- il calore scorre dai punti caldi ai punti freddi.

In un sistema di reattore ad acqua pressurizzata o PWR il calore scorre attraverso l'acqua, ovvero dal punto più caldo della centrale, al punto più freddo, e cioè all'aria all'interno della torre di raffreddamento. La quantità di flusso del calore dipende da:

- quantità di calore,
- gradiente termico, ovvero la differenza di temperatura tra un punto caldo e uno freddo,
- conduttività termica, ovvero facilità di trasferimento del calore.

GRADIENTE TERMICO

Esiste un gradiente termico fra due punti che hanno temperature diverse. Se queste non sono molto diverse fra loro il gradiente è basso.

Se le temperature sono molto diverse il gradiente è alto.
Se vogliamo fare scorrere il calore dal punto A al punto B, il punto A deve essere più caldo del punto B. Più è caldo A rispetto a B, o in altre parole più alto è il gradiente termico tra A e B, più calore scorrerà.

CONDUTTIVITA' TERMICA

La conduttività termica misura con quanta facilità il calore può scorrere tra due punti. Se il calore scorre facilmente, la conduttività termica è alta, se non scorre facilmente la conduttività termica è bassa.

Nella centrale nucleare la conduttività termica è alta quando circola una grande quantità di acqua intorno alla fonte di calore. Il concetto è semplice: "Più l'acqua è in diretto contatto con il calore, più calore potete trasferire con l'acqua". Ad esempio, la conduttività termica è al massimo quando tutte e quattro le pompe dell'RCS sono in funzione e il flusso dell'acqua intorno al nocciolo è massimo.

LA CONDUTTIVITA' TERMICA IN RAPPORTO AL GRADIENTE TERMICO

Vi è un rapporto tra conduttività e gradiente termico. Se la conduttività termica tra i punti A e B è alta, cioè se il calore scorre facilmente tra A e B, non vi occorre un alto gradiente tra A e B per mantenere un buon flusso di calore. Se però diminuite la conduttività termica dovrete aumentare il gradiente termico per mantenere un buon flusso di calore. Vediamo come funziona questo scambio nella centrale nucleare (Fig. 13).

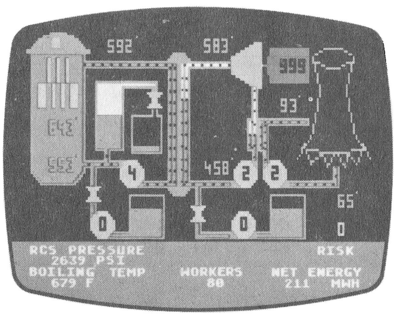


Fig. 13a - Conduttività termica alta nell'RCS.

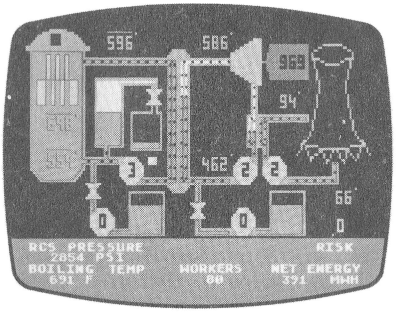


Fig. 13b - Conduttività termica bassa nell'RCS - Aumento temperatura.

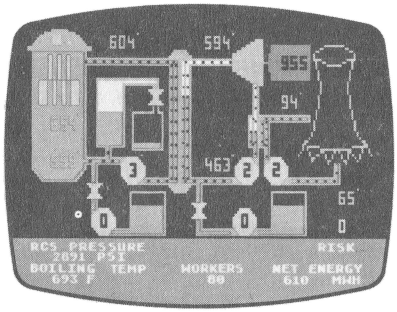


Fig. 13c - Conduttività termica più alta nell'RCS - Stabilizzazione delle temperature.

Fig. 13 - Conduttività termica in rapporto al gradiente termico.

REATTORE CIRCUITO PRIMARIO

Con le quattro pompe dell'RCS in funzione la conduttività nell'RCS è alta (Fig. 13a), cosicché non occorre un gradiente termico alto per far scorrere il calore dal nocciolo verso l'acqua. Se però spegnete una delle pompe, la conduttività termica del circuito primario diminuirà, e si avrà un minore flusso di calore nell'acqua. Il nocciolo tratterrà il calore e si scalderà sempre di più (Fig. 13b). Quando il nocciolo sarà così caldo da creare un gradiente termico maggiore, rilascerà più calore nell'acqua e la temperatura dell'RCS si stabilizzerà ad un livello più alto (Fig. 13/c).

CIRCUITO PRIMARIO/CIRCUITO SECONDARIO

Supponiamo ora di spegnere una delle pompe di alimentazione del circuito

secondario, diminuendo la quantità di acqua che scorre attraverso il generatore di vapore. La conduttività termica del circuito secondario diminuirà e scorrerà meno calore tra l'acqua del primario e l'acqua del secondario. L'RCS si scalderà finchè il gradiente termico tra l'RCS e il circuito secondario sia abbastanza alto da immettere più calore nell'acqua di quest'ultimo.

CIRCUITO SECONDARIO/CIRCUITO TERZIARIO

Chiudendo una pompa del terziario diminuirà la quantità di acqua che scorre attraverso il condensatore e diminuirà anche la conduttività termica del circuito terziario. Il vapore che scorre nel condensatore lascerà passare meno calore nell'acqua del secondario. Le temperature in quest'ultimo circuito aumenteranno fino a che il gradiente termico tra il sistema secondario e terziario sarà abbastanza alto da immettere più calore nell'acqua.

EFFETTI DI RITORNO DEL CALORE

Ogni variazione del gradiente termico in un qualisiasi punto del sistema di trasferimento del calore si ripercuote a monte nella centrale.

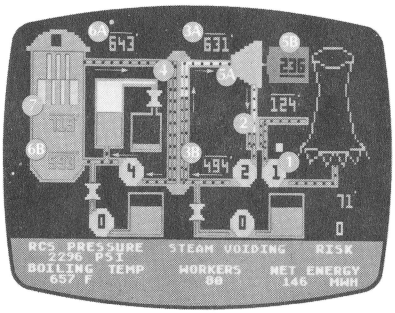


Fig. 14 - Ritorno di calore in una centrale nucleare

- Spegnendo una pompa (1) del circuito terziario il flusso dell'acqua attraverso il condensatore diminuisce, abbassando la conduttività termica del circuito terziario.
- Di conseguenza nel circuito secondario meno calore si trasferisce dal vapore all'acqua e il calore risale nel circuito.
- Il circuito secondario si riscalda (3A, 3B) facendo diminuire il gradiente termico tra il primario e il secondario.
- L'acqua del primario trasferisce meno calore all'acqua del secondario che scorre atraverso il generatore di vapore (4).

- L'acqua del secondario produce meno vapore per le turbine (5A) cosicché queste rallentano e viene prodotta meno elettricità (5B).
- Dato che meno calore viene immesso nell'acqua del secondario, il calore risale nel primario (6A, 6B) diminuendo il gradiente termico tra il primario e il nocciolo del reattore.
- Il nocciolo rilascia meno calore all'acqua del primario e si surriscalda (7).

Comportamento della Pressione nella Simulazione

PRESSIONE E PUNTO DI EBOLLIZIONE

Vi domandate perchè l'acqua nel sistema di raffreddamento secondario bolle fino a diventare vapore nel generatore di vapore, mentre l'acqua nel circuisto primario non si comporta nella stessa maniera? Tutti sanno che il punto di ebollizione dell'acqua si trova a 212°F, e che la temperatura dell'acqua nel vessel è assai più alta di tale valore. Perchè l'acqua non bolle?
La risposta sta nella pressione dell'acqua. La temperatura dell'ebollizione dell'acqua dipende dalla pressione. **Più alta è la pressione, più alto è il punto di ebollizione.**
L'acqua nel sistema di raffreddamento secondario viene mantenuta ad una pressione di circa 1.000 psi. A questa pressione, il punto di ebollizione si trova a circa 550°F. Dato che l'acqua nel generatore di vapore si scalda più di così, essa bolle trasformandosi in vapore. Noi vogliamo che l'acqua del secondario diventi vapore nel generatore di vapore perchè il vapore fa girare le turbine assai meglio dell'acqua. Però non vogliamo che l'acqua del primario bolla. Manteniamo pertanto l'acqua del primario ad una pressione compresa tra 2.200 e 2.300 libbre per pollice quadrato (psi) in modo che la temperatura di ebollizione si aggirerà intorno a 655°F (la pressione del primario e la temperatura di ebollizione appaiono nelle didascalie in basso a sinistra; vedasi Fig. 2). Questa temperatura è abbastanza elevata per un trasporto ottimale di calore alle turbine, ma sufficientemente bassa per evitare che l'acqua che circonda il nocciolo del reattore possa bollire e produrre vapore. Se intorno al nocciolo si formano delle bolle di vapore, apparirà la scritta "**BOLLE DI VAPORE**": una condizione di grave pericolo.

BOLLE DI VAPORE

Avete sperimentato la formazione di bolle di vapore quando avete spento le pompe del primario al fine di fondere il nocciolo. Ricorderete che è apparso il segnale luminoso "**BOLLE DI VAPORE**" e che ha suonato l'allarme. Ecco cosa è successo. Quando avete spento le pompe del primario, avete diminuito il flusso d'acqua intorno al nocciolo. Questo ha fatto diminuire la conduttività termica dell'acqua e il nocciolo ha trattenuto calore. In poco tempo il nocciolo si è tanto scaldato da far bollire l'acqua che lo circondava, facendola evaporare.
Voi sapete che quando l'acqua in una pentola comincia a bollire, le

bolle di vapore si formano prima nello strato più basso dell'acqua che è lo strato più vicino alla fonte di calore. La stessa cosa è accaduta nell'involucro del reattore. Si sono formate delle bolle di vapore nello strato d'acqua intorno al nocciolo. Dato che il vapore è un pessimo conduttore di calore, ha agito da isolante e ha impedito al nocciolo di liberare calore nell'acqua. In poco tempo il nocciolo si è scaldato tanto da fondere.

La formazione di vapore avviene ogni volta che viene disattivata una pompa d'acqua in uno dei tre circuiti. Spegnendo una di queste pompe si riduce il flusso dell'acqua, il che fa diminuire la conduttività e causa una rimonta del calore. Il nocciolo del reattore si scalda molto rapidamente quando spegnete una pompa del terziario, meno rapidamente quando spegnete una pompa del secondario e più lentamente quando spegnete una pompa del circuito primario.

COME CONTROLLARE LA FORMAZIONE DI VAPORE

Se si accende il segnale **"BOLLE DI VAPORE"** dovrete agire tempestivamente per farlo spegnere. Dovete non solo impedire una fusione ma dovete anche mantenere in funzione le turbine. I generatori non possono continuare a generare elettricità se nelle turbine viene immesso calore insufficiente. Ci sono due modi di controllare la formazione di vapore:

- Primo modo
  Aumentare la pressione del primario e il punto di ebollizione pompando altra acqua dall'HPI nel vessel del reattore.
- Secondo modo
  Diminuire la produzione di potenza calando le barre di controllo nel nocciolo del reattore.

Prima agirete e più facile vi sarà arrestare la formazione di vapore. Aprite la valvola HPI e accendete le pompe HPI. Calate parzialmente le barre di controllo nel nocciolo. Se necessario, disattivate il reattore. Alla fine le turbine si fermeranno del tutto e la produzione di elettricità calerà a zero. Ma tutto ciò non metterà fine ai vostri problemi. Dovrete continuare a raffreddare il nocciolo del reattore fino all'arresto della formazione di vapore.

QUANDO LA PRESSIONE E' TROPPO ALTA

L'alta pressione che adoperiamo per stabilizzare il sistema di trasferimento del calore e per generare elettricità non deve variare, nè dobbiamo permettere che diventi troppo alta. Le variazioni o "transitori" di pressione sono degli improvvisi aumenti di pressione. Se questi superano i 3.000 psi possono provocare qualcosa come un "colpo di frusta" su scala gigante. Sigilli, valvole e perfino tubi possono scoppiare e causare una perdita dal refrigerante nel circuito primario (Loss of coolant Accident-LOCA).

LOCA (PERDITA DEL REFRIGERANTE)

Se si verifica un LOCA e il circuito primario comincia a perdere ve ne accorgerete. La scritta RCS nella parte bassa dello schermo sparirà improvvisamente e avrà inizio la formazione di vapore (scritta "Bolle di Vapore"). Appene vedete questa scritta dovrete agire rapidamente. Accendete tutte e quattro le pompe HPI sperando che possiate pompare acqua nell'involucro più velocemente di quanta ne possa sfuggire attraverso le rotture. Mandate il reattore in **SCRAM**: così arrestato si scalderà velocemente. Una migliore soluzione sarebbe di impedire il verificarsi del LOCA mantenendo la pressione RCS ben al di sotto di 3.000 psi.

IL PRESSURIZZATORE

Il pressurizzatore aiuta a mantenere la pressione del primario al giusto livello, generando una bolla di vapore che fa da "cuscino" ai "transitori" di pressione. Quando la pressione è normale, il pressurizzatore è per metà vapore e per metà acqua. Se la pressione è troppo alta, il pressurizzatore contiene soprattutto acqua. Se la pressione è troppo bassa contiene prevalentemente vapore. Se vi è troppo poco vapore il pressurizzatore corre il pericolo di diventare "WATER SOLID" (tutta acqua): un pressurizzatore inutilizzabile. Se si presentasse un "transitore" di pressione potrebbe facilmente danneggiare il circuito primario. Per impedire che il pressurizzatore diventi tutt'acqua si accendono delle resistenze elettriche all'interno del pressurizzatore stesso che fanno bollire l'acqua per aumentare la dimensione della bolla di vapore.
Se la pressione del primario aumenta oltre le 2.400 psi dovete aprire la valvola di sicurezza del pressurizzatore (PRV) e far defluire il vapore del serbatoio sottostante. Ciò farà abbassare la pressione del primario. Chiudete la valvola quando la pressione ritorna a livelli normali (fra 2.200 e 2.300 psi) e il pressurizzatore è all'incirca metà acqua e metà vapore. Non dimenticate di chiudere la valvola PRI, altrimenti il livello dell'acqua nel pressurizzatore salirà nuovamente e la pressione del primario calerà troppo.

QUANDO LA PRESSIONE E' TROPPO BASSA

Una pressione troppo bassa nel primario fa diminuire la conduttività termica e le temperature cominciano a salire. Nello stesso tempo il calo di pressione abbassa il punto di ebollizione dell'acqua. LA combinazione di un aumento di temperatura e di una diminuzione del punto di ebollizione nel primario causerà la formazione di vapore e accenderà il segnale "**BOLLE DI VAPORE** ".

7 Indicatori di Livello della Centrale

Le scritte con i dati di pressione e produzione di energia e i livelli dell'acqua nei serbatoi indicano se la centrale sta funzionando normalmente o meno. Sta alla vostra abilità saper leggere e interpretare questi dati ed essere promossi all'esame di qualificazione: **il gioco dello SCRAM**. Gli indicatori vi vengono mostrati nella figura 15.

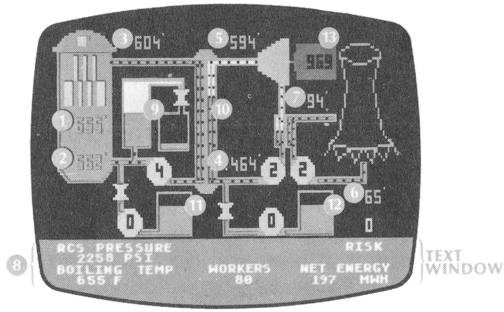


Fig. 15 - Indicatori di livello della Centrale.

Temperatura

TEMPERATURA DEL REATTORE

La temperatura del reattore (il nocciolo e l'acqua del primario alla superficie del nocciolo) vi viene mostrata fra le temperature di ingresso e di uscita del vessel nella figura 15. La temperatura del reattore diminuisce quando vengono calate le barre di controllo, e aumenta quando queste vengono sollevate.

Se viene staccata una pompa di uno dei tre circuiti si riduce il trasferimento del calore, che rimonta verso il nocciolo e sale la temperatura del reattore. La rapidità con la quale aumenta la temperatura dipende dalla pompa. Un arresto di una pompa del terziario o del secondario fa salire la temperatura più rapidamente che non quello di una pompa del primario. Quando il nocciolo del reattore si scalda abbastanza da far bollire l'acqua che lo circonda, comincia il fenomeno "Bolle di Vapore".

TEMPERATURE DEI CIRCUITI

Ogni circuito nel sistema di trasferimento del calore mostra due dati di temperatura: uno per il braccio freddo, ovvero per la temperatura all'ingresso, e uno per il braccio caldo, o temperatura all'uscita (Fig. 15).

In tutti i circuiti scende sia la temperatura del braccio caldo che quella del braccio freddo quando vengono calate le barre di controllo, mentre le temperature risalgono quando le barre vengono sollevate. L'arresto delle pompe di uno dei tre circuiti riduce la conduttività termica che a sua volta fa diminuire il trasferimento di calore. Nel circuito in cui avviene l'arresto la prima reazione è un calo di temperatura nel braccio freddo e un aumento di temperatura nel braccio caldo. Poi, mentre il gradiente termico migliora, aumentano ambedue le temperature. Le temperature aumentano nel circuito interessato e in tutti i circuiti a monte quando il calore rimonta verso il nocciolo attraverso il sistema.

Pressione e Punto di Ebollizione del Circuito Primario

Gli indicatori della temperatura, della pressione e del punto di ebollizione si trovano nella parte bassa dello schermo (Fig. 15). Il punto di ebollizione aumenta e diminuisce con la pressione. Normalmente, la pressione del primario aumenta e diminuisce con la temperatura del reattore. Se la temperatura aumenta, aumenta la pressione; se la temperatura cala, calerà anche la pressione.

Se la temperatura del primario sale oltre le 3.000 psi la sovrapressione causerà un LOCA (perdita del refrigerante). Per ridurre la pressione nel primario ed evitare il LOCA occorre calare le barre di controllo per raffreddare il nocciolo e aprire la valvola del pressurizzatore per far passare il vapore nel serbatoio di scarico.

Se la temperatura del primario cala troppo, diminuisce il punto di ebollizione mentre aumenta la temperatura del reattore. Quasi subito inizia la formazione di vapore. Un calo di pressione del circuito ha luogo se la valvola PRV resta aperta o se si verifica una perdita nel primario.

NOTA

Se non viene chiusa la valvola HPI dopo che sono state spente le pompe HPI, vi sarà una perdita d'acqua attraverso la valvola, calerà la pressione del primario e inizierà la formazione di vapore.

Per fermare la formazione del vapore occorre pompare acqua dall'HPI nel vessel del reattore al fine di aumentare la pressione del circuito e il punto di ebollizione; oppure, occorre calare le barre di controllo per diminuire la temperatura del reattore. Se questa è molto alta, vi sarà la possibilità che dobbiate usare ambedue le tecniche.

Livelli dell'Acqua

GENERATORE DI VAPORE

La proporzione tra acqua e vapore nel generatore di vapore indica se sta entrando una quantità sufficiente di acqua. Se si arresta una pompa di alimentazione, il livello dell'acqua scende. Se si pompa acqua dal serbatoio ausiliario, il livello dell'acqua sale.

NOTA

> Se la valvola del sistema ausiliario non è chiusa dopo che le pompe vengono spente, vi sarà una perdita di acqua dalla valvola e il livello dell'acqua del generatore di vapore calerà. Ciò farà abbassare la pressione, diminuirà il flusso di calore, causerà una rimonta del calore e la formazione di vapore nel circuito primario.

SERBATOI DELL'HPI E DEL SISTEMA AUSILIARIO

In questi serbatoi il livello dell'acqua calerà quando le valvole sono aperte e le pompe accese.

Produzione del Generatore Elettrico

La potenza elettrica del generatore, che varia a seconda delle condizioni di temperatura e pressione dei vari circuiti, è indicata nel rettangolo verde che simboleggia il generatore (Fig. 15); la potenza del generatore viene misurata in Megawatts (MW).

Se il trasferimento di calore è normale e non avviene la formazione di vapore, la potenza del generatore aumenta e diminuisce con la potenza nucleare. Se calate le barre di controllo, scorre meno calore verso le turbine, le quali rallentano. Se invece sollevate le barre, il flusso di calore aumenta e le turbine accelerano. Se ha luogo la formazione di vapore, la potenza del generatore diminuisce e alla fine si azzera, mentre il calore scorre in quantità sempre minore verso le turbine.

Funzionamento di Prova

Ora fate funzionare nuovamente la simulazione. Questa volta cercate di prevedere la reazione della centrale nucleare mentre calate le barre, accendete e spegnete le pompe, aprite e chiudete le valvole.

8 Il Gioco dello SCRAM

Lo **SCRAM** mette alla prova la vostra abilità a far funzionare la centra-
le nucleare in condizioni molto difficili. Lo scopo è di generare più
elettricità possibile e disattivare il reattore prima che fonda il
nocciolo. Vi sembra facile? Aspettate e vedrete quali rischi dovrete
correre. Abbiamo organizzato terremoti che distruggeranno una componen-
te dopo l'altra. Dovrete individuare e riparare le componenti avariate,
e continuare a generare elettricità, finché vi verranno a mancare gli
operai per le riparazioni. Poi dovrete decidere quando è il momento
di disattivare il reattore (cioè di mandarlo in **SCRAM**).

Punteggio

Il vostro punteggio consiste nel numero di MWH Megawatts/ore di ener-
gia netta che riuscirete a produrre prima di arrestare il reattore.
Questo numero viene indicato sotto la scritta **ENERGIA PRODOTTA** in bas-
so a destra. Alla fine di questo manuale vi forniamo una scheda per
il punteggio ove potrete annotare via via i punti.

Per Diventare Operatore

La vostra capacità di diventare un operatore dipende dalla quantità
di energia netta che riuscirete a produrre prima di disattivare il
reattore, e da quanto rischio correrete nel farlo. Il rischio consiste
in danni da terremoto. Più alto è il rischio, maggiore è il numero
dei terremoti e danni prodotti. Vi sono nove livelli di rischio. Se
riuscirete a generare 300 MWH di energia al rischio 9 verrete qualifi-
cato "Operatore di reattore" e otterrete un lavoro nella nostra centra-
le nucleare. Se riuscirete a generare 500 MWH di energia a rischio
9 diverrete un Operatore "Senior", che è il massimo dei gradi. Fino
ad oggi, solo due persone nella nostra centrale nucleare di **Valle Fio-
rita** sono riuscite a diventare Operatore "Senior". Forse voi sarete
la terza persona!

Se Fondete il Nocciolo del Reattore

Se fondete il nocciolo siete bocciati all'esame. Non contate neppure
i MWH di elettricità generati: il vostro punteggio è zero. Vi diamo
però ancora una possibilità: ricominciate il gioco al medesimo livello
di rischio.

Come si Gioca

Vi sono cinque fasi nel gioco dello **SCRAM**:

1) Costruire una nuova centrale nucleare.

2) Aumentare il livello di rischio.

3) Individuare i danni da terremoto.

4) Far intervenire la squadra per le riparazioni.

5) Disattivare il reattore.

COSTRUIRE UNA NUOVA CENTRALE NUCLEARE

Dovrete disporre di una centrale nuova di zecca per giocare allo **SCRAM**. Se avete fatto esperimenti con la vecchia centrale, fondete il nocciolo e distruggetela. E' l'ultima volta che potete fondere il nocciolo senza essere penalizzati, quindi vi consigliamo di approfittarne!

NOTA

> Il modo più veloce per fondere il nocciolo è quello di spegnere ambedue le pompe del circuito secondario o del terziario.

Dopo la fusione, premete il tasto **START** per costruire una nuova centrale. Noi aspettiamo che abbiate terminato. Pronti?
Osservate ora la scritta **RISCHIO**. E' lo zero arancione nell'angolo inferiore destro dello schermo.

AUMENTARE IL LIVELLO DI RISCHIO

All'inizio, sopra la scritta **RISCHIO** appare zero perchè non state correndo rischi. Per iniziare il gioco dovete portare **RISCHIO** fino a un numero da 1 a 9. Più alto è il numero e più terremoti avrete, con i conseguenti danni da riparare. Vi diremo poi in che modo aumentare il rischio.
Ora parliamo di danni da terremoto.

INDIVIDUARE I DANNI DA TERREMOTO

Come potrete sapere quando avverà un terremoto? Non vi preoccupate, lo verrete a sapere. Soprattutto non mettete mano al televisore. Subito dopo la scossa, udrete il rumore di qualcosa che si rompe. Si tratta di una pompa o di una valvola, ma quale? Avranno tutte un aspetto normale, e sembreranno funzionare come sempre. Ciononostante qualche pompa o valvola è sicuramente rotta. Ogni terremoto rompe qualcosa. Dovrete trovare l'avaria il più velocemente possibile, prima che venga un altro terremoto a distruggere qualche altra componente.
Come individuare una pompa o una valvola rotta se hanno tutte un aspetto normale e funzionante? Dovrete tenere conto degli indicatori. Se

avete buoni voti in termodinamica 1 e sapete leggere gli indicatori, dovreste riuscire a dedurre quale componente si è rotta. Osservate i cambiamenti di temperatura, di pressione, di potenza e guardate i livelli dell'acqua nel generatore di vapore, nel pressurizzatore e nei serbatoi ausiliari.
Ad esempio, supponiamo che tentiate di aprire la valvola del pressurizzatore per ridurre la pressione nel primario. Vi sembrerà che si apra e che il vapore passi nel serbatoio di scarico, ma non fatevi ingannare. La prova più sicura è il livello dell'acqua, sia nel pressurizzatore che nel serbatoio. Se non si alza il livello dell'acqua, PRV è stata danneggiata e non può essere aperta.
Ora vi diamo una piccola informazione che può esservi molto utile: una pompa non si può rompere se non è in funzione. Una valvola, invece, si può rompere sia quando è aperta che quando è chiusa.

INTERVENTO DELLE SQUADRE

Quando pensate di avere individuato la pompa o la valvola rotta, spostate il cursore verso di essa. Premete il tasto sul Governo a Cloche e muovete la cloche verso destra e verso sinistra. Osservate ora lo spazio delle didascalie: lampeggeranno le parole **ESATTO!** o **ERRATO!**. Sia che abbiato agito in maniera giusta che sbagliata, quando avete individuato una componente, cinque dei vostri 80 operai si muovono verso la centrale per la riparazione. Non li vedrete lavorare: dovrete fidarvi della nostra parola. Se avete individuato la componente giusta, gli operai la ripareranno immediatamente. Non vedrete né udrete il rumore delle riparazione, ma potete stare sicuri che è stata eseguita. Naturalmente, può sopravvenire un altro terremoto e danneggiare la stessa componente. I terremoti sono imprevedibili! Se avete individuato una componente sbagliata, gli operai entreranno ugualmente per ripararla, ma non troveranno l'avaria. Così avrete sprecato cinque operai. Nessuno degli operai che avete mandato dentro potrà tornare al lavoro. L'NRC- Autorità USA per la Sicurezza Nucleare-ha delle leggi assai severe riguardo alla quantità di radioattività cui può esporsi ogni operaio. Quelli che avete mandato nella centrale nucleare hanno subito l'esposizione massima, e non potranno tornare che fra tre mesi. Nel frattempo vi resta un minor numero di operai per eseguire le riparazioni. Il numero di operai che vi restano viene indicato dalla scritta **TECNICI** nel centro dello spazio della didascalia. Quando se ne sono andati tutti gli 80 operai siete nei guai. Se tentate di mandare dentro gli operai quando non ce ne sono più lampeggerà la scritta **NO TECNICI** nello spazio della didascalia. Quindi non mandate i vostri operai ad eseguire riparazioni se non siete ben certi di quale valvola o pompa avariata si tratti. D'altro canto, se ci pensate troppo, le avarie possono accumularsi, causando la fusione del nocciolo del reattore. Quando vi sembra sia giunto il momento giusto, calate le barre nel nocciolo e cominciate a raffreddarlo. Se la temperatura scenderà sotto i 200°F apparirà la scritta **ARRESTO FREDDO**, e il gioco sarà terminato.

Adesso Bisogna Giocare!

Muovete il cursore verso il basso fino alla scritta **RISCHIO** e portatelo al livello 1 con il Governo a Cloche. Si cambia il livello di rischio nello stesso modo in cui si accende una pompa o si apre una valvola. Tenete premuto il tasto rosso e spingete il Governo a Cloche verso l'alto. Se al rischio 1 avete un punteggio di almeno 1.000 MWH di energia prodotta, passate al rischio 2, e continuate ad avanzare fino al rischio 3. La scheda nel retro del manuale vi aiuterà a capire quando il vostro punteggio vi permette di avanzare verso un livello di rischio maggiore.

NOTA

> Ogni volta che aumentate il livello di rischio, il contatore **ENERGIA PRODOTTA** torna a zero.

9 Consigli Vincenti

Come Migliorare il Punteggio

MANTENETE IN FUNZIONE LE POMPE PRINCIPALI

La migliore strategia nel gioco dello **SCRAM** è quella di far produrre al reattore un massimo di energia per un tempo più lungo possibile. Per ottenere ciò dovrete mantenere in funzione tutte le pompe principa- li. La perdita di una di queste pompe vi obbligherebbe ad abbassare la produzione di energia, diminuendo così il vostro margine di sicurez- za. Questo succede soprattutto se perdete una pompa del circuito secon- dario o terziario, dato che ve ne sono solo due su ognuno. Se perdete una pompa del primario dovete diminuire un poco la potenza del reatto- re ma non ne sarete molto danneggiati.

COME LEGGERE E INTERPRETARE GLI INDICATORI

Per determinare se si è fermata una pompa del primario, del secondario o del terziario leggete le temperature dei bracci caldi e freddi in ogni circuito. Se in un circuito vi è un aumento di temperatura nel tratto caldo e una diminuzione nel tratto freddo, capirete che la pom- pa in quel circuito è rotta.

Un'avaria alla pompa viene anche individuata attraverso i livelli del- l'acqua. Ad esempio, se il livello acqua-vapore nel generatore di vapo- re scende più del normale, saprete che sta entrando meno acqua nel generatore di vapore, e ne dedurrete che si è rotta una pompa di ali- mentazione del secondario.

La rottura di una pompa abbasserà la conduttività termica in generale e farà diminuire la produzione di elettricità. Comunque, non vi confon- dete se la potenza non cala immediatamente dopo la rottura di una pom- pa principale. Ricordate che tutti gli indicatori riflettono processi fisici che hanno una loro inerzia naturale. Il generatore può continua- re a produrre energia per un po' di tempo dopo la rottura della pompa, ma alla fine calerà la produzione di energia.

La maniera più facile per diagnosticare la rottura dell'HPI o del si- stema ausiliario del secondario è di controllare i livelli dell'acqua nei serbatoi. Se si suppone che il sistema stia funzionando, ma il livello dell'acqua non cala, o è rotta la valvola o si sono fermate tutte le pompe. E' più facile che si sia rotta una valvola, ma se ave- te subito diversi terremoti è possibile che si siano rotte tutte le pompe.

Potete anche sapere se l'HPI funziona dando un'occhiata al pressurizza-

tore e all'indicatore di pressione del primario in basso a sinistra. Se l'HPI funziona, la pressione del primario dovrebbe salire e il livello dell'acqua nel pressurizzatore dovrebbe aumentare. Ugualmente, capirete che il sistema ausiliario del secondario funziona dando una occhiata al livello dell'acqua nel generatore di vapore, che sale quando viene pompata acqua ausiliaria di alimentazione nel generatore di vapore.

RICORDATE: Una pompa non accesa non può rompersi.

PROVATE LE VALVOLE

Se una valvola si rompe in posizione di chiusura, può darsi che non vi accorgerete del danno nel leggere gli indicatori. Non saprete che la valvola è rotta fino a più tardi, quando cercherete di aprirla. Se avete il sospetto che una valvola sia rimasta bloccata, guardate se funziona come dovrebbe. Il livello dell'acqua nel serbatoio si alza e si abbassa come dovrebbe? Se non lo fa la valvola è rotta.

SEGNATEVI TUTTI I DANNI

Ricordate che ogni terremoto danneggia una valvola o una pompa e dovrete riparare ognuna di esse. Vi aiuterà tenere il conto di ogni pezzo che si rompe, delle avarie che riparerete e delle avarie che non riuscirete a riparare. Ricordate anche che una componente riparata può rompersi di nuovo.

Appendice

Precisione della Simulazione

Lo **SCRAM** è una simulazione assai sofisticata di una centrale nucleare; come tutte le simulazioni, però, si tratta di un modello semplificato dell'originale. Una vera centrale nucleare è infinitamente più complessa. Ad esempio, essa dispone di 500 miglia di tubazioni, due generatori di vapore, quattro turbine, quattro generatori e parecchie torri di raffreddamento iperboliche.

Nell'intento di semplificare il modello abbiamo omesso molti dispositivi di sicurezza che si trovano in una vera centrale nucleare, alterando inavvertitamente la simulazione. Ad esempio una centrale nucleare vera possiene un importante sistema chiamato sistema di emergenza per il raffreddamento del nocciolo (ECCS). Questo sistema consiste in almeno tre subsistemi indipendenti, ciascuno dei quali provvede a fornire acqua supplementare per raffreddare il nocciolo del reattore in caso di emergenza. Noi abbiamo incluso solo uno di questi subsistemi, l'LHP.

Abbiamo anche omesso l'enorme edificio in cemento che ospita il reattore. E' stato progettato per trattenere la radioattività in caso di fusione. Questo edificio di conteneimento è abbastanza solido per resistere agli stress della maggior parte dei casi di fusione. Mentre una fusione distruggerebbe una centrale nucleare, vi sarebbero pochissime probabilità che le perdite radioattive siano così ingenti da danneggiare la popolazione.

Per darvi un controllo completo sulla vostra centrale nucleare, abbiamo omesso tutti i sistemi automatici di sicurezza. Un'autentica centrale nucleare è irta di impianti automatici di sicurezza. Questi impianti fanno scattare la disattivazione al primo segnale di guasto e sono molto efficaci. Un'altra limitazione dello **SCRAM** è l'idea che una centrale nucleare non è sicura di fronte al terremoto. A un livello di rischio 9 tutte le pompe e tutte le valvole possono andare distrutte in meno di cinque minuti. In realtà, le pompe e le valvole vere non sono così delicate. L' NRC si assicura che tutte le pompe e le valvole critiche possano resistere al peggior terremoto che si stima possa avvenire nella zona.

Infine, la velocità con cui si succedono le situazioni nella nostra centrale nucleare non è realistica. Si può passare da "situazione normale" alla fusione in meno di due minuti. Un nocciolo di reattore non potrebbe mai fondere così rapidamente. Per essere più precisi, occorrerebbero circa 6 ore. Sapendo che voi non aspettereste sei ore per

vedere verificarsi questo evento, ci siamo presi la libertà di accele rarne il corso.

L'Incidente a Three Mile Island

Questo resoconto dell'incidente di Three Mile Island è tratto dalle seguenti pubblicazioni:

1) Inchiesta sull'incidente di Three Mile Island del 28 Marzo 1979 del "Office of Inspection and Enforcement, Investigative Report N° 50320/79-10; Office of Inspection and Enforcement, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C. (August 1979).

2) Rapporto della Commisione Presidenziale sull'incidente di Three Mile Island, John G. Kemeny, Presidente, Washington D.C. (Ottobre 1979).
   Nel resoconto che segue ci si riferisce alla Commissione Presiden ziale come "Commissione Kemeny" e il Rapporto della Commissione viene chiamato "Rapporto Kemeny".

L'incidente ha avuto luogo alle 4 del mattino di mercoledì 28 Marzo 1979. Una valvola difettosa si bloccò arrestando il flusso d'acqua che alimentava le pompe del circuito secondario, causandone l'arresto. A quel punto, l'acqua nel generatore di vapore cominciò a vaporizzarsi. Il reattore si disattivò automaticamente e si misero in marcia automa ticamente le pompe di alimentazione ausiliarie del secondario. Il si stema di alimentazione ausiliario, però, non funzionò perchè qualcuno aveva chiuso le valvole sulle pompe, una trasgressione gravissima.
Senza più un filo d'acqua nel circuito secondario, il circuito prima rio si scaldò rapidamente, facendo salire la pressione. L'aumento di pressione provocò l'apertura della valvola PRV che fece sfogare vapore dal pressurizzatore. Quando la pressione del circuito fu stabilizzata, la valvola tentò di chiudersi, ma rimase bloccata aperta. Per compli care il problema, l'indicatore nella sala di controllo mostrava che le valvole erano chiuse.

L'acqua del primario fluì attraverso la PRV nel serbatoio di scarico, e la pressione del circuito diminuì rapidamente. Questo calo di pres sione fece scattare automaticamente le pompe HPI, che cominciarono a pompare acqua nel vessel. Mentre la pressione nel circuito aumenta va, cominciò a salire il livello dell'acqua nel pressurizzatore. Quan do gli operatori se ne accorsero, pensarono che le pompe HPI stessero pompando troppa acqua e si affretterono a spegnerle per impedire al pressurizzatore di divenire rigido, cioè privo del cuscino di vapore. E fu la cosa peggiore che potessero fare.

Senza acqua di raffreddamento, la temperatura del reattore salì alle stelle. A 2.300°F lo zirconio del rivestimento del combustibile fece reazione con il vapore, corrodendo le barre di combustibile. Queste cominciarono a disintegrarsi, liberando idrogeno e materiale fortemen

te radioattivo nell'acqua del circuito. Gas e materiale radioattivo furono trasportati dall'acqua attraverso la PRV aperta dentro al serbatoio di scarico al quale, essendo troppo pieno, erano saltati i sigilli. L'acqua del primario, pertanto, cominciò a penetrare nell'edificio di contenimento.

Alle 13.50 circa di mercoledì l'idrogeno nell'edificio di contenimento esplose. l'esplosione non causò alcun danno, ma spaventò parecchie persone. La paura aumentò quando si venne a sapere, il sabato seguente, che la **NCR** (Commissione per la Sicurezza Nucleare) stava analizzando l'eventualità di un'esplosione di idrogeno all'interno del reattore. Secondo il Rapporto Kemeny, questi timori erano infondati.
"Durante il week-end vi fu grande preoccupazione riguardo ad una potenziale esplosione di idrogeno nel reattore. Ma il pubblico non seppe mai che si trattò di un timore infondato, di un increscioso errore, anche perchè la NCR non si preoccupò di informare il pubblico di aver sbagliato" (Rapporto Kemeny pag. 126).

L'acqua radioattiva del primario calando dal serbatoio di scarico nell'edificio di contenimento, venne automaticamente pompata in appositi contenitori destinati agli scarichi radioattivi, nel fabbricato ausiliario. Ben presto questi contenitori straripano, liberando radioattività nel fabbricato ausiliario e da lì nell'ambiente circostante. Se gli operatori avessero spento le pompe, la radioattività sarebbe rimasta entro le mura, relativamente sicure, dell'edificio di contenimento, evitando di spargersi nell'atmosfera.

Nella serata di mercoledì 28 Marzo, la crisi si era placata. Gli errori della mattinata erano stati individuati e corretti. L'acqua scorreva il sistema si era stabilizzato e aveva inizio il lungo, lento e delicato processo di raffreddamento.

Fuori dalla centrale, la crisi si prolungò a causa di valutazioni contrastanti riguardo al pericolo, disinformazione e incertezza su come procedere. La Commissione Kemeny: "Abbiamo constatato che gli abitanti dei dintorni di Three Mile Island sono stati sottoposti ad un grave stress psichico. Per tutta la prima settimana dopo l'incidente, si parlò molto delle gravi conseguenze che avrebbe potuto provocare. Per varie volte, alti funzionari della NCR e il Governo dello Stato presero in considerazione la possibilità di una massiccia evacuazione. Sabato e Domenica, altri funzionari della NCR ritennero erroneamente che ci fosse un imminente pericolo di esplosione di una bolla di idrogeno nel vessel del reattore, e si parlò ancora di evacuazione" (Rapporto Kemeny pag. 13).

La Commissione Kemeny venne alla conclusione che "La conseguenza più grave dell'incidente sulla salute della popolazione fu un violento stress psicologico di breve durata" (Rapporto Kemeny pag. 13).

Le conseguenze della radioattività liberata nell'ambiente furono valutate dalla Commissione come segue: "Si ritiene che fra il 28 Marzo e il 15 Aprile 1979 la dose collettiva di radioattività subita dalla

popolazione abitante entro un raggio di 50 miglia dalla centrale nuclea re potesse essere valutata a circa 2.000. Si ritiene che la dose complessiva di radiazione subita da tale popolazione per cause ambientali naturali ammonti a 24.000 rem-persona. Di conseguenza, l'incremento di dose alle persone dovuto all'incidente risultava meno dell'1% del livello annuale del fondo naturale. La dose media per una persona abitante entro 5 miglia dalla centrale nucleare sarebbe stata circa del 10% della dose annuale dovuta al fondo naturale, e probabilmente ancora minore" (Rapporto Kemeny pag. 34).

La Commissione concluse: "Sulla base di attuali dati scientifici, le radiazioni subite dalla popolazione esposta alla radioattività liberatasi durante l'incidente furono talmente lievi che non vi fu un sensibile aumento di casi di cancro, anomalie dello sviluppo o malformazioni genetiche risultanti dall'incidente di Three Mile Island" (Rapporto Kemeny pag. 34).

ATARI®

ATARI International (Italy) Inc.
Viale della Liberazione, 18

20124 MILANO

Codice DXT 4123